

Quantitative Visualisierung
komplexer verfahrenstechnischer Strömungsvorgänge
mit der digitalen Particle Image Velocimetry

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Oliver Pust
aus Helmstedt

Hamburg, im April 2001

Erster Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Gert Böhme
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Dr. h. c. Franz Durst

Tag der mündlichen Prüfung: 17. April 2001

Gedruckt mit Unterstützung der Universität der Bundeswehr Hamburg.

Berichte aus der Strömungstechnik

Oliver Pust

**Quantitative Visualisierung komplexer
verfahrenstechnischer Strömungsvorgänge mit der
digitalen Particle Image Velocimetry**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Pust, Oliver:

Quantitative Visualisierung komplexer verfahrenstechnischer
Strömungsvorgänge mit der digitalen Particle Image Velocimetry / Oliver Pust.

Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus der Strömungstechnik)

Zugl.: Hamburg, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2001

ISBN 3-8265-8863-0

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8863-0

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist das wesentliche Ergebnis meiner Forschungstätigkeit als Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Strömungslehre und Strömungsmaschinen der Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer und Gutachter Herrn Prof. Dr. rer. nat. Gert Böhme, der mit ständigem Interesse die Fortschritte meiner Arbeit begleitete. Er räumte mir den Freiraum bei der Gestaltung meines Forschungsgebietes ein, der mir meine zweite Zeit an der Universität immer in bester Erinnerung bleiben lassen wird.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Franz Durst, der sich trotz seines prall gefüllten Terminkalenders bereit erklärte, das zweite Gutachten über meine Dissertation anzufertigen und meine Doktorprüfung mitzugestalten. Sein hoch geschätztes Fachwissen speziell über laseroptische Meßtechniken war mir steter Ansporn.

Die Durchführung meiner Versuche im Labor für Strömungslehre wäre ohne die dort tätigen Mitarbeiter Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Warnecke und Herrn Martin Kitzmann unmöglich gewesen. Ihnen gebührt mein besonderer Dank für ihre ideenreiche und selbständige Verwirklichung meiner meist nur grob skizzierten Ideen.

Des weiteren bedanke ich mich bei meiner Kollegin und meinen Kollegen für ihre Diskussionsbereitschaft und ihre Anregungen sowie bei denen, die es auf sich genommen hatten, meine Dissertationsschrift auf Allgemeinverständlichkeit und Fehler aller Art hin Korrektur zu lesen.

Das Verständnis meiner Lebenspartnerin Anja Hatscher und die Wiedersehensfreude meines Sohnes Paul Frédéric, der seinen Vater aufgrund der weiten Entfernung meist nur am Wochenende sah, haben sehr viel zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einleitung	1
2 Particle Image Velocimetry	5
2.1 Einleitung	5
2.2 Prinzip und Aufbau eines PIV-Systems	5
2.3 Hinzufügen der Partikel	6
2.4 Beleuchtung der Partikel	10
2.5 Aufnahme des reflektierten Lichts	16
2.6 Bestimmung der Partikelverschiebung	17
2.6.1 Kreuzkorrelation	18
2.6.2 Autokorrelation	23
2.6.3 Einflüsse auf das Meßergebnis	24
2.6.4 Lokalisation des Korrelationsmaximums	25
2.7 Weiterverarbeitung der Meßdaten	27
2.8 Zusammenfassung	28
3 Laser Doppler Velocimetry	29
3.1 Einleitung	29
3.2 Dopplereffekt	30
3.2.1 Dopplereffekt beim LDV	31
3.2.2 Zweistrahl-LDV-System	33
3.2.3 Das Interferenzstreifenmodell	34
3.2.4 Meßvolumen des Zweistrahl-LDV-Systems	35
3.3 Optoelektronische Signalwandlung und Auswertung	37

Inhaltsverzeichnis

3.4	Richtungsbestimmung	38
3.5	Meßsysteme	39
3.6	Zusammenfassung	40
4	Bewertung und Vergleich von PIV und LDV	41
4.1	Bewertung der LDV-Meßtechnik	41
4.2	Bewertung der PIV-Meßtechnik	43
4.3	Vergleich von PIV und LDV	45
4.4	Einsatzgebiete von PIV und LDV	46
4.5	DGV als Alternative zu PIV und LDV	48
5	Evaluierung der PIV mittels LDV und numerischer Simulation	53
5.1	Einleitung	53
5.2	Versuchsaufbau zur Zylinderumströmung	54
5.3	Numerische Simulation	56
5.4	Ergebnisse	59
5.4.1	Ergebnisse für das Anfahren der Kármánschen Wirbelstraße . .	59
5.4.2	Ergebnisse für die periodische Kármánsche Wirbelstraße	62
5.5	Zusammenfassung	63
6	Qualitätssteigerung durch direkte Kreuzkorrelation	69
6.1	Einleitung und Motivation	69
6.2	Methoden zur Auswertung von Partikelbildern	70
6.3	Implementierung der direkten Kreuzkorrelation	73
6.4	Beschreibung der Auswerteparameter	76
6.5	Ergebnisse der untersuchten Auswertemethoden	77
6.6	Zusammenfassung	79
7	Geschwindigkeitsfeld in einem SMX-Mischer	87
7.1	Mischen in der Verfahrenstechnik	87
7.2	Der SMX-Mischer	88
7.3	Versuchsaufbau und -durchführung	91
7.3.1	Versuchsstand zum SMX-Mischer	91

7.3.2	Stoffeigenschaften der Versuchsflüssigkeiten	97
7.3.3	Lage der Meßebenen im Modell des SMX-Mischers	102
7.4	Ergebnisse für Glycerin	104
7.5	Ergebnisse für CMC	116
7.6	Vergleich der Strömungen bei Glycerin und CMC	122
7.7	Symmetriebetrachtungen	127
7.7.1	Symmetrieuntersuchungen bei Glycerin	128
7.7.2	Symmetrieuntersuchungen bei CMC	130
8	Zusammenfassung und Ausblick	133
8.1	Zusammenfassung	133
8.2	Ausblick	134
	Literaturverzeichnis	137
	Glossar	143
A	Anhang	149
A.1	Schleichende Umströmung einer Ecke	149

Verzeichnis der verwendeten Symbole

Symbol	Bedeutung	Dimension ¹	Seite
Allgemeine Formelzeichen			
a	Beschleunigung	LZ^{-2}	6
a_k	Relaxationsspannungen	$ML^{-1}Z^{-2}$	98
b	Stegdicke	L	95
c	Lichtgeschwindigkeit	LZ^{-1}	30
d	Abstand, Durchmesser	L	34
d_p	Partikeldurchmesser	L	6
e	Einheitsvektor		30
f	Ablösefrequenz	Z^{-1}	56
f	Vektor der Volumenkraftdichte	$ML^{-2}Z^{-2}$	56
$f(i,j), g(k,l)$	Graustufenverteilung der Teilbilder		17
\bar{f}, \bar{g}	mittlere Intensität der Teilbilder		74
f_D	Dopplerfrequenz	Z^{-1}	33
f_E	Empfängerfrequenz	Z^{-1}	30
f_P	Streuungsfrequenz	Z^{-1}	31
f_0	Laserlichtfrequenz	Z^{-1}	30
g	Fallbeschleunigung	LZ^{-2}	6
i, j, k, l	Positionen in der Bildebene	Pixel (px)	17
i', j'	Bildabmessungen der Teilbilder	Pixel (px)	17
\hat{j}	imaginäre Einheit, $\hat{j} = \sqrt{-1}$		72
l	Länge	L	89
m, n	räumliche Verschiebung	Pixel (px)	18
n	Brechzahl		100
n	Fließindex		122
p	Druck	$ML^{-1}Z^{-2}$	56
t	Zeit	Z	32
t_0	Anfangszeit	Z	17
t_P	Prozesszeit	Z	123
\bar{t}	entdimensionierte Zeit		56
u, v, w	kartesische Geschwindigkeitskomponenten	LZ^{-1}	32

Symbol	Bedeutung	Dimension ¹	Seite
u_m	mittlere Strömungsgeschwindigkeit	LZ^{-1}	55
\mathbf{v}	Geschwindigkeitsvektor	LZ^{-1}	30
w_m	mittlere Anströmgeschwindigkeit	LZ^{-1}	95
\bar{w}	mittlere Geschwindigkeit im Mischer	LZ^{-1}	95
x, y, z	kartesische Koordinaten	L	18
A	Querschnittsfläche	L^2	95
D	Zylinderdurchmesser	L	55
\mathbf{D}	Verzerrungsgeschwindigkeitstensor	Z^{-1}	58
De	Deborah-Zahl		123
E	elektrische Feldstärke	$MLZ^{-3}I^{-1}$	32
$F(M,N), G(M,N)$	Graustufenverteilung der Gesamtaufnahmen		17
$F(u, v), G(u, v)$	Fourier-Transformierte reellwertiger Funktionen		71
$G'(\omega)$	Speichermodul	$ML^{-1}Z^{-2}$	98
$G''(\omega)$	Verlustmodul	$ML^{-1}Z^{-2}$	98
I	elektrische Stromstärke	I	32
L	Länge eines Mischelementes	L	122
\mathbf{L}	Geschwindigkeitsgradiententensor	Z^{-1}	56
M, N	Position in der Bildebene	Pixel (px)	17
M', N'	Bildabmessungen der Gesamtaufnahmen	Pixel (px)	16
Re	Reynolds-Zahl		55
Sr	Strouhal-Zahl		56
\mathbf{T}	Tensor der Reibungsspannungen	$ML^{-1}Z^{-2}$	56
U	Fluidgeschwindigkeit	LZ^{-1}	6
U_g	Sinkgeschwindigkeit	LZ^{-1}	6
U_P	Partikelgeschwindigkeit	LZ^{-1}	6
U_S	Differenzgeschwindigkeit	LZ^{-1}	6
\dot{V}	Volumenstrom	L^3Z^{-1}	89
Z	Druckverlustfaktor		89
Griechische Symbole			
α, Θ_B	Winkel		31
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit	Z^{-1}	98
$\dot{\epsilon}$	Dehngeschwindigkeit	Z^{-1}	122
η	dynamische Viskosität	$ML^{-1}Z^{-1}$	6
η_0	Nullviskosität	$ML^{-1}Z^{-1}$	99
λ, λ_k	Relaxationszeiten	Z	98
λ_C	Zeitkonstante im Carreau-Modell	Z	122

Symbol	Bedeutung	Dimension¹	Seite
λ_0	Lichtwellenlänge	L	34
ν	kinematische Viskosität	L^2Z^{-1}	97
ξ, ζ	kartesische Koordinaten	L	18
$\bar{\xi}, \bar{\psi}$	kartesische Koordinaten, dimensionslos		54
ρ	Fluiddichte	ML^{-3}	6
ρ_P	Partikeldichte	ML^{-3}	6
ϕ	Kreuzkorrelationskoeffizientenfunktion		74
ω	Kreisfrequenz	Z^{-1}	32
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	kartesische Komponenten des Wirbelvektors	Z^{-1}	105
Δf	Bandbreite der Absorptionslinie	Z^{-1}	51
Δf_E	Frequenzverschiebung	Z^{-1}	31
Δn	Brechzahlunterschied		100
Δp	Druckverlust	$ML^{-1}Z^{-2}$	89
Δp_L	Druckverlust eines Mischelementes	$ML^{-1}Z^{-2}$	122
Δt	Zeitabstand	Z	17
Φ	Kreuzkorrelationsfunktion		18

¹ Im internationalen Einheitensystem mit Masse [M], Länge [L], Zeit [Z] und elektrischer Stromstärke [I] als Basisgrößen, sofern nicht anders genannt